冰巨星大气研究进展

王聪 [1, 3]*，熊明 [1, 3]，李力刚 [2, 4]，陈鼎 [1, 3]

（1、中国科学院 国家空间科学中心，北京 100190）

（2、 中国科学院 上海天文台，上海 200030）

（3、 中国科学院大学，北京 100049）

（4、中国科学院 行星科学重点实验室，上海 200030）

摘要：与类木行星等气态巨行星相比，冰巨星是由大量比氢氦重的气体成分（水、氨、甲烷等）组成的气体行星，天天星和海王星便是典型的冰巨星。天王星和海王星的大气中保存着太阳系形成初期的气体，对研究太阳系和行星的形成演化有很大帮助；对其大气的动力学研究可以了解到大气内部的结构、热源驱动机制和对流机制；随着证认的系外行星数量逐渐增加，发现类海王星型系外行星是普遍存在的。梳理了天王星和海王星的大气结构和大气成分以及太阳系外类海王星的研究进展，并对未来冰巨星的探测和研究做了展望。

关 键 词：行星；冰巨星；大气；成分；系外行星

1 引 言

冰巨星是指内部结构中有大量“冰”存在的巨行星，这种“冰”是由原始行星盘中低折射率的物质（比如H_2O, CH_4, NH_3等）冷凝而成[1]，其外围仍存在有大量的氢和氦。天王星和海王星是典型的冰巨星。天王星和海王星的成分和内部结构反映出了不同于气态巨行星（木星和土星）的形成环境和演化过程[2]，同时二者在表面温度，有效温度，磁场结构、大气纬向环流等物理特征方面都十分的类似[3]。天王星和海王星的质量分别为$14.5M_\oplus$和$17.1M_\oplus$（$M_\oplus$为地球质量），由于冰巨星的引力势能较大，对于太阳系的形成起到了重要的作用，它们保留了大量太阳系形成初期的气体[1]，包含着原恒星云的状态条件和行星形成的位置信息[2]，因此研究冰巨星的大气成分和大气结构不仅有助于研究其内部热源的驱动机制和对流机制，也有助于研究太阳系和行星的形成及演化历史。

在太阳系内的冰巨星（天王星、海王星）由于距离比较远，目前只有 1977 年美国发射的“旅行者 2 号”飞行器对其进行过飞掠探测[4-6]，此后便没有飞行器对其进行过近距离考察。根据“旅行者 2 号”飞行器的射电掩星观测[7, 8]，木星和土星的大气温度分别为$165 \pm 5K$和$134 \pm 4K$（1bar处），而天王星和海王星的大气温度分别为$76 \pm 2K$和$72 \pm 2K$（1bar处），可见冰巨星的大气温度是远远低于气态巨行星的。

气态巨行星有大体积的气态壳层包围在行星核幔周围，而冰巨星行星核幔周围只有相对较薄的气态壳层[9]。它标志着冰巨星在形成时具有不同于气态巨行星形成时的过程，可以认为是过早终止生长的气态巨行星，终止的原因则是由于在吸积气体的过程中恒星星云过早的消散[4, 9]。Bryden 和 Lin 等人[10]在 2008 年研究海王星形成时发现，星云中气体的消散限制了原海王星气体壳层的质量。不仅如此，冰巨星与气态巨行星有着完全不

* 通讯作者，E-mail：wangcong315@mails.ucas.ac.cn

同的的能量和物质传输机制[2]，Lopez 等人[11]认为天王星内部结构是绝热近均匀的；Nettelmann 等人在 2016 年的研究[3]发现，在天王星富含岩冰的内部区域与富含氢氦的外部区域之间存在一个过渡带，这个过渡带是一个超级绝热层，隔绝了内部与外部的热交换。

在“旅行者 2 号”飞掠天王星和海王星时，发现天王星和海王星的磁场是非偶极、非轴对称的，与地球、木星和土星的磁场有很大的不同[12]。天王星和海王星的表面磁场强度均大约为2×10^{-5}T[13]；根据 2015 年 Nellis 等人[12]的研究结果，天王星和海王星的磁场是由行星内部金属氢的磁流体发电机过程生成，发电机位于行星的外层，靠近分子氢向金属氢转换的深度，这个深度大约位于冰巨星的90%半径处，因而磁场呈现出非偶极形态。到目前为止天王星和海王星这种独特的磁场依然是行星研究的重要课题。

1986 年“旅行者 2 号”飞掠天王星时，利用射电和光学观测得到了天王星 5 颗主要卫星的质量等其他物理信息[4]；1989 年“旅行者 2 号”飞掠海王星时不仅发现了 6 颗新的卫星，并且对海卫一的大气、形态学以及物理特征等进行了研究[6]；1997 年乔荣川等人[14]利用 1990 年来积累的观测数据，根据天王星卫星的运动理论模型（GUST86）建立了一套天王星 5 颗主要卫星的星历表计算和误差分析程序，并且在 1999 年[15]利用改进后的 CCD 定位测量处理方法，使得天王星卫星定位精度达到了 0.07’’。2014 年张会彦等人[16]利用小口径望远镜对海卫一经行了定位观测，精度达到了 0.1’’；2015 年 Camargo 等人[17]通过分析 1992 年至 2011 年 18 年间的观测数据，将天王星的 5 颗主要卫星的位置精度提升到几十个微角秒。由于天王星卫星运动的特征为人们研究长期摄动理论提供一个理想的实物模型[18]，对于卫星轨道定位和研究太阳系的形成过程有很大帮助，因此外行星暗弱卫星的高精度天体测量与运动学研究也是未来的研究热点。

对于冰巨星而言，大气中所含成分的相对丰度及其氧化程度隐含了行星形成和演化的信息[19]，研究大气的成分和结构将有助于揭示太阳系行星的形成和演化过程。甲烷在天王星和海王星大气中的沉降和迁移是研究其大气垂直结构和大气动力学的重要特征，Karkoschka 等人[20, 21]通过研究和对比天王星和海王星大气中甲烷含量的分布得出了两颗行星相似的沉降迁移模式，同时也佐证了两颗行星具有相近的大气结构；大气中氦的丰度是研究行星起源、演化、以及内部结构的重要参数[5]，但是氦的精确丰度一直是天文学家们想得到的数据，Hildebrand 等人[22]、Orton 等人[23]通过$7\mu m-3mm$红外光谱对天王星大气进行分析得出天王星大气中氦的体积混合比为$40\pm20\%$； Tyler 等人[5]通过分析天王星射电掩星的数据，得出天王星大气中对流层内氦的摩尔比为0.15 ± 0.05；Conrath 等人[24]结合射电掩星的数据得出来更精确的分子摩尔比为0.152 ± 0.033。

本文第 2 节，第 3 节将分别对冰巨星的大气结构和成分研究进展做出详细的评述，第 4 节将回顾系外冰巨星研究。并在第 5 节对相关研究进展进行总结和展望。

2 冰巨星大气结构的研究

在冰巨星中，大气层和内部结构的分界并不是十分的明显。一般将气体行星中可以与外界直接进行辐射交换的部分称为大气层[1]。由于目前受到观测仪器的限制，对于冰巨星大气结构的研究只能以天王星和海王星为对象，对其进行射电、红外、光学等波段的观测及理论研究来揭示冰巨星大气的信息。

2.1 大气的垂直结构

“旅行者 2 号”飞行器分别于 1986 年 1 月和 1989 年 8 月飞掠天王星和海王星[25, 26]，

获得了这两颗冰巨星的第一手资料。通过"旅行者 2 号"自身携带的无线电设备对两颗冰巨星进行了无线电掩星试验，得到了两者大气顶层温度随压强变化的剖面图（见图 1）。图 1 不仅显示了天王星[7]和海王星[8]大气中温度随压强变化的剖面图，同时也将土星[27]和木星[28]大气中温度随压强变化的剖面图标出并作对比。可以明显看出，天王星和海王星的大气垂直结构十分接近，似乎揭示了冰巨星大气的普遍情况。天王星大气中压强在 $0.3-2.3$bar之间的温度垂直梯度为0.95 ± 0.1 K/km，相比于木星大气的温度垂直梯度2.1 K/km来说[28]，变化相对平缓，大气层中温度最低可达到53.1K，对应的压强在100mbar左右[7]；海王星大气中的最低温度可达到51.7K，对应的压强在130mbar左右[8]。天王星大气层中 1bar 的等值线半径在赤道附近时为25559 ± 4km（R_{eq}），在极地附近为24973 ± 20km（R_p），其椭率为（$(R_{eq}-R_p)/R_{eq}$）0.02293 ± 0.00080[7]；海王星大气层中的则分别为24766 ± 15km、24342 ± 30km，椭率为0.0171 ± 0.0014[8]。由此可以看出海王星的形状比天王星更接近圆形，这应该是海王星具有更大的密度造成的，即使它比天王星自转的更快。

天王星和海王星磁场磁轴相对其自转轴具有很大的角度，并且偶极矩中心偏离行星几何中心[13]，造成这种现象的原因被认为是冰巨星中导电区域复杂的流体运动[29]。受到磁场几何结构的影响，两颗冰巨星的磁层也和太阳系内其他的行星有明显的不同[30]。根据"旅行者 2 号"的观测数据，天王星和海王星的磁层是由一个延展的外磁层和一个内磁层组成，内磁层包含了高能粒子辐射带和低能的等离子层[31]；并且由于磁轴相对于太阳风方向的方位不同，磁层结构会出现季节性的变化[30]。

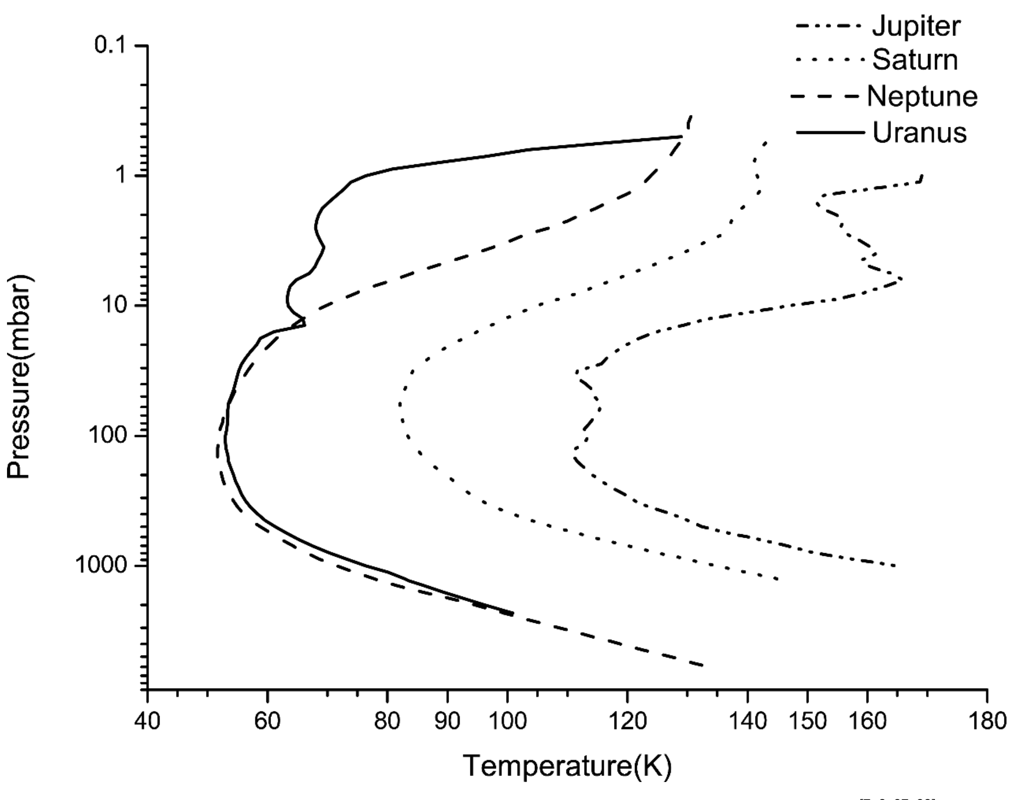


图 1 冰巨星和气态巨行星的大气温度相对于压强的变化[7, 8, 27, 28]

海王星大气在不同的深度（压强）处存在着不同成分的云层[6, 8, 32]（如图 2），在对流层上层到平流层低层（压强为5mbar）之间存在着低阶的碳氢化合物，比如C_4H_2、C_2H_2、C_2H_6等，它们是由太阳的紫外辐射催化甲烷生成[6]；在压强为 1bar 区域的下面

$14Km$处存在一个$2 - 3Km$的低折射率的云层，在这个区域甲烷的丰度随高度的增加迅速降低[8]；根据射电掩星的数据[8]，在压强为$1.9bars$的区域云层到达底部，甲烷的混合比达到 0.02；在大气层的更深处存在着可能由硫化氢冰颗粒组成的云层，氨也可能同时存在[32]；氨在压强为 6.3bar 温度为 135K 处的混合比为$550 \pm 150/10^6$（550 ± 150 parts per billion）[8]。

天王星大气中也存在着和海王星大气类似的分层[2, 4, 5, 33, 34]（如图 3），位于顶部的电离层具有多层结构包含了两个明显的层次，分别位于$100mbar$之上$2000km$和$3500km$处[5]；在压强小于$100mbar$的平流层中存在这一定数量的碳氢化合物，这些碳氢化合物可以产生雾霾[2]；根据“旅行者 2 号”的光学数据[4]，这些雾霾颗粒存在于压强大约$1bar$的云层之上，颗粒的平均半径在 0.25~0.35μm之间；在大气层中压强高于$900mbar$的区域存在一个甲烷的冷凝云层，云层的底部在压强为$1.3bar$处，甲烷的摩尔分数为 0.02[5]；2011 年时 Sromovsky 等人[33]对“旅行者 2 号”的数据再次进行分析，并认为天王星大气的垂直结构由 5 个气溶胶层组成，最上层的是平流层中的雾霾层，在对流层中存在四个气溶胶层，分别是压强在$0.1bar - 1.2bar$之间的上层对流层大气、$1.2bar - 2bar$之间的两层较为紧凑的气溶胶层以及压强大于$2bar$的底层对流层大气；2013 年 Tice 等人[34]使用 NASA 的红外望远镜对天王星大气在$0.8\mu m - 1.8\mu m$的近红外光谱进行反演分析，结果显示天王星大气垂直结构仅存在两个明显的分层，在压强低于 1bar 的上层区域存在雾霾层，在底部存在着光厚的对流云层。关于天王星的垂直分层结构尚未达成一致意见。

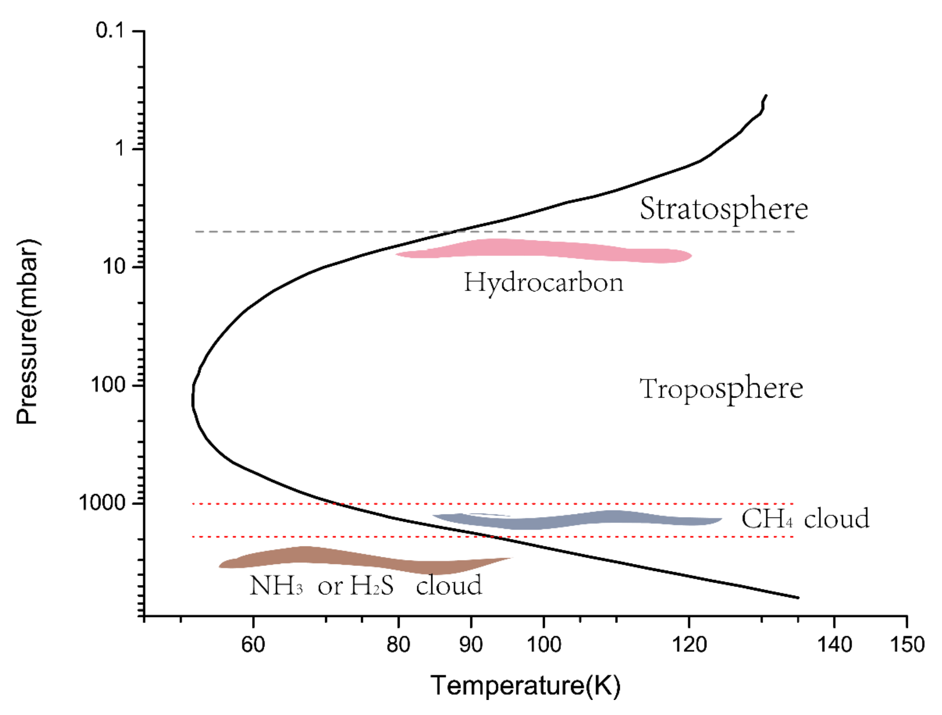


图 2 海王星大气温度相对于压强的变化图以及不同压强处成分不同的主要云层[6, 8, 32]

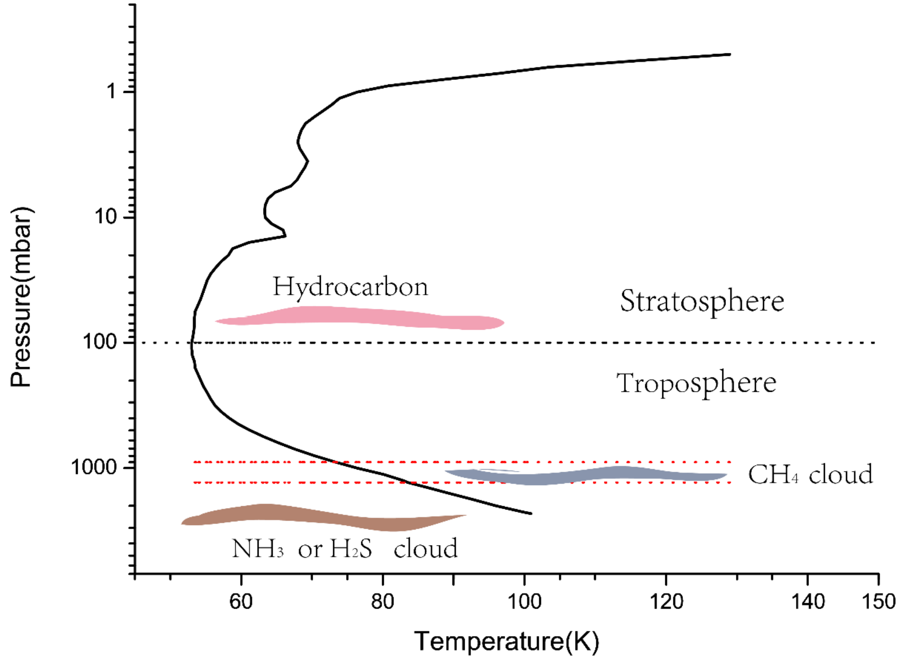


图 3 天王星大气温度相对于压强的变化图以及不同压强处成分不同的主要云层[2, 4, 5, 33, 34]

以上研究表明天王星和海王星大气的压强和温度垂直结构十分相似并且明显区别于木星等气态巨行星。但是由于缺少就位观测资料，仅能对观测到的光谱进行反演分析，大气分层信息未被充分确定，因此要得到更加详细的大气垂直结构有待于更多观测数据的补充。

2.2 大气中的纬向风结构

同气态巨行星一样，冰巨星的大气也存在方向相反，随纬度分布的环流条带，其风速是对不同时间大气云组织的特征进行对比而得出的，但是冰巨星的纬向风与气体巨行星存在很大的差异（如图 4 所示）。

天王星上云层的模式和云层的运动在光学波段上的图像[4]表明，在大气中存在明显的纬向环流，环流对于自转轴是对称的；1991 年 Allison 等人[35]使用“旅行者 2 号”图像和射电掩星数据拟合出天王星大气中纬向风结构，结果显示纬向风是南北对称的；1998 年 Karkoschka[36]利用哈勃空间望远镜拍摄到的高对比度的近红外图片拟合天王星大气的纬向风结构，得出的结果显示南北半球的结构并非完全对称； 在 2001 年 Hammel 等人[37]将哈勃空间望远镜多年来的观测数据与凯克望远镜 2000 年的观测数据结合，研究得出的纬向风结构与“旅行者 2 号”得到的探测数据符合得最好，但是拟合得到的结果都比以前的结果小一些，无法确定这是否是天王星大气纬向风的变化；2015 年 Sromovsky 等人[38]通过凯克Ⅱ对天王星大气中的 70 个离散云结构进行分析，并结合哈勃望远镜和“旅行者 2 号”的数据将天王星大气中的纬向风图扩展到60°N。

天王星大气风的纬向速度在南北纬20°左右时达到零，在南北纬$50^{\circ}-60^{\circ}$之间达到最大值$273\mathrm{m/s}$[4, 39]。海王星的纬向风速与天王星的基本相似[6]。在海王星大气中观测到的风有很大的不确定性，一部分是由于云本身运动的不均匀性，另一部分则是由于在一些纬度上云演化过快而产生的观测误差[40]。

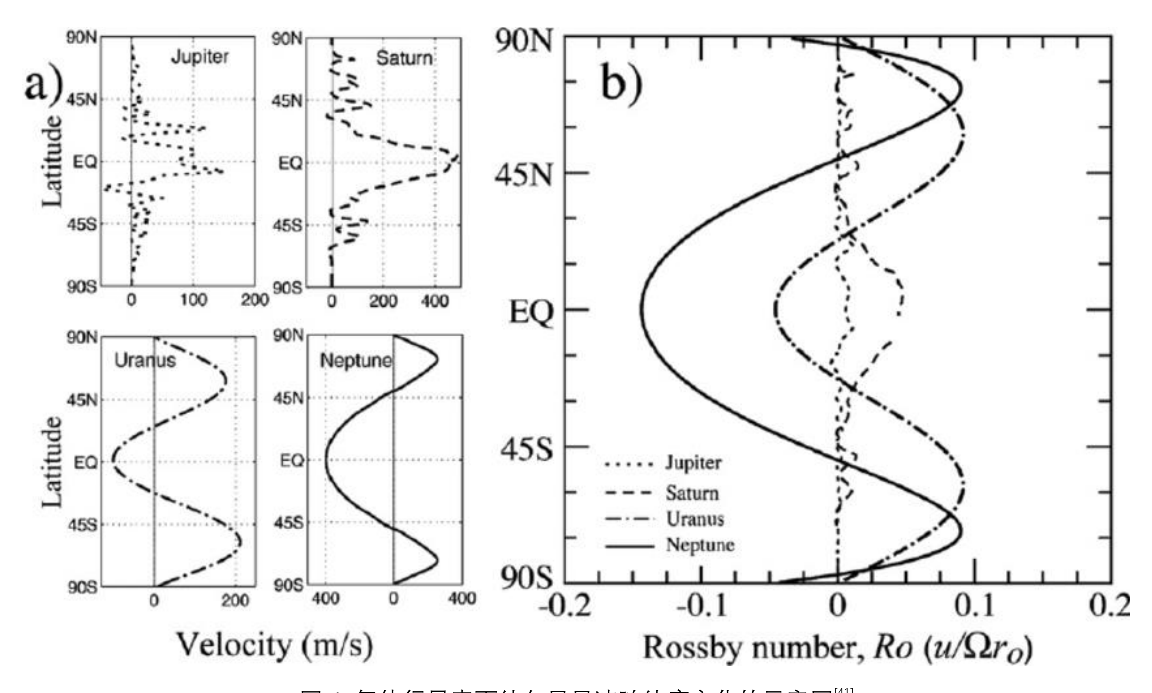


图 4 气体行星表面纬向风风速随纬度变化的示意图[41]

a） 纬向风速单位为 m/s；b）纬向风速单位为罗斯贝数

通过"旅行者 2 号"的光学图像[4]可以看出天王星纬向风的精细结构，在41°S到35°S之间至少存在着
四条完整的明暗相间的风带，这些风带在纬向上的宽度大约是700km，明显的小于土星和木星大气中的风带[42]。由于天王星 98°的自转轴倾角以及长达 84 年的公转周期，导致了天王星南北极分别接收太阳直射的时间长达 40 年，这使得太阳辐射带给天王星大气的影响明显区别于太阳系内的类木行星[37]。根据"旅行者 2 号"的数据，Pearl 等人推算出天王星内部散热和吸收太阳辐射的能量比为1.06 ± 0.08[43]，这个结果说明天王星大气动力学主要是依靠太阳辐射的能量驱动的[38]。在 2007 年天王星过春分点后，天王星大气的观测数据将会使得对天王星大气纬向风的认识更进一步[37]。

由于缺乏纬向风垂直结构的直接观测证据，对气态巨行星（木星、土星）纬向风的形成机制一直存在着两种解释模型：浅层的热风模型和深层的对流柱模型。浅层模型认为纬向风的驱动源来自太阳对行星表面的辐射加热或者云层水汽冷凝释放的潜热，能量通过斜压不稳定性从小尺度的涡旋（风暴）传递给大尺度的带状环流，即纬向风[44]。而深层模型从旋转流体动力学的 Taylor-Proudman 理论出发，在行星内部形成的柱状地转流通过涡流伸展（vortex-stretching）机制形成纬向风[45-50]。

当考虑到冰巨星（天王星、海王星）的赤道环流与气态巨行星（木星、土星）完全反向时，这两种模型的争论就变得更加复杂化了，但是持不同观点的学者依然找到了自圆其说的突破口。在深层模型阵营，Aurnou 等人[41]发现，当热浮力达到或超过科里奥利力时，深层模型可以得到向西运动的赤道环流，符合对冰巨星纬向风的观测。而 Glatzmaier 等人（2009）[51]则认为，经典的对流柱模型在行星尺度上维持从北半球延伸到南半球的细长对流柱是极其困难的，因而他采用了一个随半径变化的密度分层模型（仍然是深层模型）统一解释了赤道纬向风方向相反的事实，研究发现，赤道纬向风的方向仅仅取决于密度随半径变化曲线的凹凸性。在浅层模型阵营，Lian & Showman（2010）[52]则认为，冰巨星与气体巨行星大气中差别巨大的水含量是造成各

自赤道纬向风方向相反的主要原因，冰巨星大气含有的更多水汽在冷凝时将会释放更多的热量，从而通过热风机制形成逆向的赤道纬向风。

冰巨星大气的纬向风风速以及其随纬度变化的曲线是研究大气动力学的重要参数，但是由于缺少就位探测资料，只能通过大气中的云层运动来确定纬向风速。对于天王星而言，大气在紫外和可见光波段对比度较低，大多采用的是近红外波段对其进行观测，同时需要长时间跟踪观测；而海王星则由于大气中云结构变化很快，很难对其特征进行长时间的跟踪观测，得出的结果误差较大；同时通过对比不同年份的研究结果，发现天王星大气中纬向风风速有细微的变化，有可能是由于观测造成的误差，也有可能是由于天王星大气中纬向风自身发生了变化，最终的答案将有待于将来更精确以及更长时间的观测。

2.3 大气中的离散云组织

通过"旅行者 2 号"的光学图像[6]可以看出，海王星上面有很多离散的云组织，其中最大的离散组织是"大暗斑"（the Great Dark Spot），其纬度和经度跨度分别为20°和30°，位于$20^{\circ}S$，随后又相继在$70^{\circ}S$发现了"南极区组织"(the South Polar Feature)、在$42^{\circ}S$发现云组织"滑板车"（Scooter）、在$55^{\circ}S$发现了"第二暗斑"（the Second Dark Spot）这些较大的离散组织。相比于海王星上多变的天气，天王星大气相对宁静，"旅行者 2 号"仅在$35^{\circ}S$（被命名为S34）和$27^{\circ}S$发现两个相似的明亮结构，它们包括一个亮核和一个正纬圈方向的长尾巴[4]。

Sromovsky 等人在 1993 年[53]利用"旅行者 2 号"的数据对海王星上主要的离散云组织 GDS、DS2、"Scooter"和 SPF 等进行了动力学分析，确认 GDS 和 DS2 不同的经向漂移速率与纬度相关，并且与纬向风曲线大致吻合，但是即使结合地面的观测数据也无法得到一个决定性的长期动态约束。Kaspi 等人在 2013 年[54]利用天王星和海王星的引力场研究其大气的动力学结构，认为大气动力被限制在天气薄层内(天王星被限制在占全部质量20%的外层大气中，海王星被限制在占全部质量15%的外层大气中)而不是在厚度约 1000Km 的范围内。2014 年 Irwin 等人[55]使用欧洲南方天文台的甚大望远镜对天王星大气中新出现的一个非常亮的风暴组织进行了光谱观测，并认为这个风暴是由于对流而产生的，风暴组织南部出现的一个模糊的拖尾则是由甲烷的冷凝云导致的。Sromovsky 等人在 2015 年[38]利用凯克Ⅱ拍摄的天王星自适应近红外图像和哈勃天文望远镜的数据对天王星上的离散云组织 S34 进行了动力学分析，发现其与海王星上的 DS2 很相像，经向迁移速率与纬向风速曲线大致相符，并认为 S34 可能是由于非正压罗斯贝波（non-barotropic Rossby wave）形成。

对大气中离散的云组织的结构和成因进行研究是了解大气中热力学结构和对流的重要手段，研究冰巨星大气中的动力学结构可以推测其成因，对其进行光谱观测则可以了解这些风暴是由什么物质构成的，已有研究显示甲烷的冷凝云在其中起到了重要的作用，因此进一步探究甲烷的含量以及沉降运动也将是了解云组织演化的重要方法。

3 冰巨星大气成分的研究

冰巨星大气中包含了大量的比氢、氦重的元素组成的物质，比如C、N、O、S等。这些重元素的丰度与氢元素丰度的比值同原始行星盘的比值有差别，因此对研究行星的演化有重要意义，表格 1 总结了几种重元素的丰度比。可以看出海王星中重元素的丰度比要比天王星的大，这也是海王星密度大于天王星的原因之一。

表格 1：冰巨星大气中元素的丰度比

元素	天王星内的丰度	海王星内丰度	原始行星盘内的丰度[a]	天王星与原始行星盘丰度之比	海王星与原始行星盘丰度之比
H_e/H	$(9.0 \pm 2.0)\times10^{-2}$[b]	$(1.17 \pm 0.20)\times10^{-1}$[c]	9.69×10^{-2}	0.93 ± 0.20	1.21 ± 0.20
C/H	$(1.85 \pm 0.3)\times10^{-2}$[d]	$(1.85 \pm 0.43)\times10^{-2}$[e] $(2.47 \pm 0.62)\times10^{-2}$[f]	2.75×10^{-4}	85.9 ± 10.7	67.5 ± 15.8 89.9 ± 22.5
S/H	$(3.2 \pm 1.6)\times10^{-4}$[g]	$(3.2 \pm 1.6)\times10^{-4}$[g]	1.55×10^{-5}	21.0 ± 10.5	21.0 ± 10.5

a: Lodders, et al., (2009); b: Conrath, et al., (1987); c: Conrath, et al., (1991); d: Sromovsky, et al., (2011);
e: Baines & Smith, (1990); f: Karkoshka & Tomasko, (2011); g: de Pater, et al., (1991)

3.1 甲烷

1987 年 Lindal 等人[7]利用"旅行者 2 号"射电掩星的数据证实了天王星大气中存在着甲烷云层，并分析出甲烷随高度的变化，其模型 F 得出深层的甲烷混合比为 0.04；1995 年 Baines 等人[56]借助光谱分析得出天王星和海王星上甲烷的混合比均为 0.023，这和 Lindal 等人[7, 8]得到的结果相同；2015 年 Lellouch 等人[57]利用赫歇尔望远镜的观测数据，通过分析甲烷特有的旋转线得出天王星大气平流层中甲烷的摩尔分数为大约9×10^{-4}，海王星平流层中的甲烷丰度为（1.15 ± 0.10）$\times10^{-3}$。目前由于缺少就位探测资料，对天

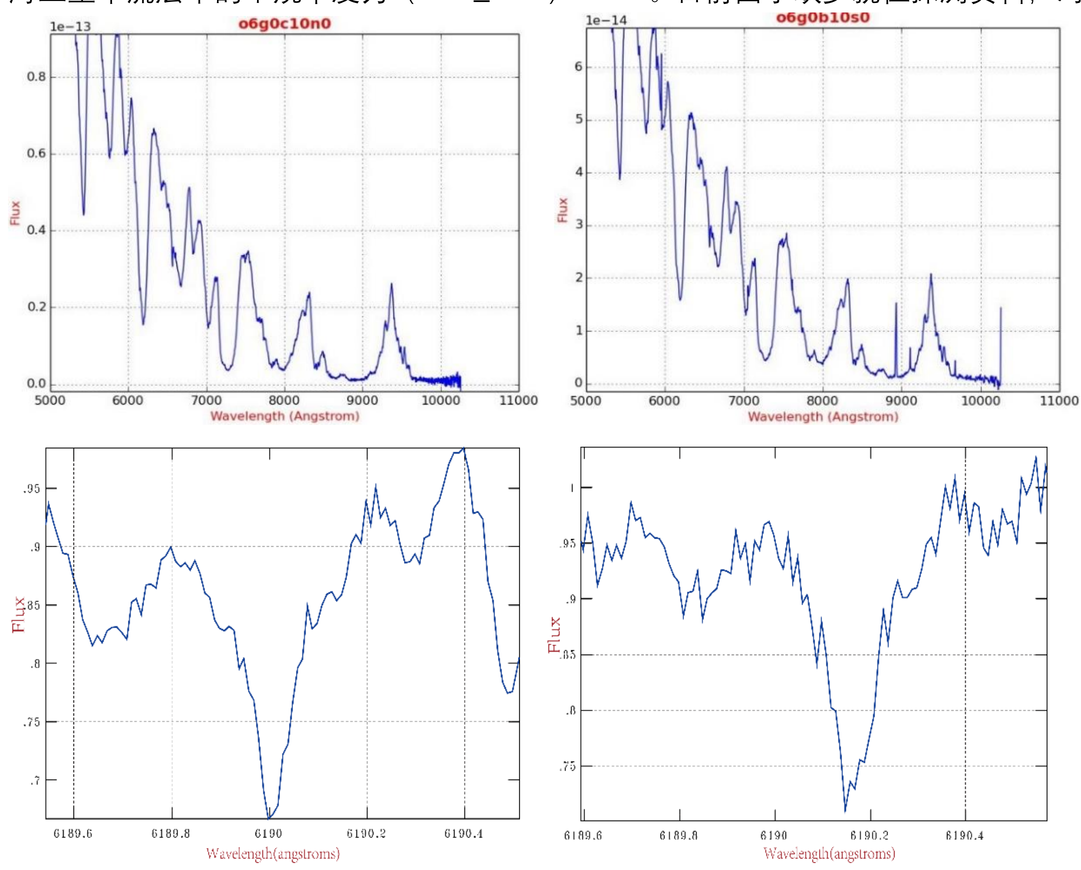


图 5 利用哈勃空间望远镜拍摄到的天王星（左上）、海王星（右上）中低分辨率光谱，以及 2.16m 望远镜拍摄到的天王星（左下）、海王星（右下）大气中甲烷在 619nm 处的高分辨率吸收线

王星和海王星大气中甲烷的研究主要依靠光谱进行，图 5 是哈勃空间望远镜在 2002 年拍摄到的天王星[20]和 2003 年拍摄的海王星[21]的中低分辨率光谱，以及利用中国科学院国家天文台兴隆观测基地的 2.16 米望远镜拍摄到的天王星和海王星大气中甲烷在 619nm 处的吸收线（王聪等，in prepare）。

2009 年 Karkoschka 等人[20]通过研究哈勃望远镜空间望远镜影像摄谱仪（STIS）在 2002 年的数据，发现天王星大气中甲烷的含量从南半球的高纬度向低纬度地区升高，混合比从 0.014 上升至 0.032，同时发现甲烷在纬度上的变化与更深层的氨气混合比的变化很相似；2011 年 Karkoschka 等人[21]又发现了在海王星大气中甲烷混合比同样存在类似的分布变化；2014 年 Sromovsky 等人[58]通过 2012 年哈勃望远镜和凯克望远镜的观测数据发现天王星大气中甲烷的体积混合比从北半球低纬度地区的 0.04 下降到北纬60°的 0.02，并认为这种下降存在一种循环机制，在低纬度地区甲烷气体上升到甲烷冷凝层，由于甲烷冷凝和甲烷冰晶的产生，甲烷被从低处抽运到高处并通过经向环流到达高纬度地区，在那里下降到低处；2015 年 Sromovsky 等人[59]通过分析分析天王星在 2007 年到达春分点时哈勃空间望远镜和凯克望远镜的数据，发现一条亮带在天王星北纬45°形成的同时，在南纬45°附近一条亮带正在消失，他们认为这种现象是由太阳造成的；同年 Sromovsky 等人[58]还发现甲烷在天王星北极极区的沉降与在南极极区的沉降在大小和深度上是相似的，并且认为这种相似十分的重要，因为在北极区分布的大量的小的云结构通常被认为是对流产生的，而在南极区域则从未观测到过有对流活动的明显信号。2016 年 Luszcz-Cook 等人[60]基于凯克望远镜的数据对海王星大气中甲烷的分布进行反演分析，发现甲烷含量从南半球的高纬度向低纬度地区升高，这一结果与 Karkoschka 等人在 2011 年的发现相符，总体认为海王星大气中甲烷含量随纬度降低而升高的趋势与天王星的变化趋势相比较弱。

甲烷在天王星和海王星大气中的空间分布仍然需要未来的观测来进行更为精确的分析，并且甲烷的这种分布也需要一个较为复杂的经向环流模型来进行解释，这对于了解冰巨星的大气动力学很有帮助。通过对比两颗冰巨星上甲烷的含量分布、变化和迁移模式可以研究两颗冰巨星的大气动力学结构和热传输机制。

3.2 氘和氦

1988 年 Smith 等人[61]通过研究 HD (Hydrogen Deuteride)在6050Å附近的特征，得出天王星和海王星氘比氢的比例上限是 0.0001；1998 年 Feuchtgruber 等人[62]使用 ISO(Infrared Space Observatory)的短波光谱第一次精确的探测了天王星和海王星上的 HD，并得出天王星和海王星大气中 D/H(氘比氢)值分别为$5.5^{+3.5}_{-1.5}\times10^{-5}$和$6.5^{+2.5}_{-1.5}\times10^{-5}$；同一年 Geiss 等人[63]得出了原始恒星云中 D/H 值为（2.1 ± 0.5)$\times10^{-5}$，因此可以看出冰巨星中是富含氘的；在 2013 年 Feuchtgruber 等人[64]又通过 Herschel-PACS 的测量值得到了更精确的 D/H 值，天王星和海王星的 D/H 值分别为（4.4 ± 0.4）$\times10^{-5}$和（4.1 ± 0.4）$\times10^{-5}$，两者数值非常的接近。同年 Feuchtgruber 等人[64]还利用行星演化过程中的内部模型，得出了天王星和海王星原行星盘中的 D/H 值，分别在（$5.75\sim7.0$）$\times10^{-5}$之间和（$5.1\sim7.7$）$\times10^{-5}$之间。

早在 1972 年 Gautier 等人[65]就发现通过分析行星的远红外谱线，可以得到行星大气中H_2/He值；1988 年 Conrath 等人[24]结合“旅行者 2 号”射电掩星数据和 112 幅红外干涉光谱仪（IRIS）拍摄到的光谱图像（分布在$2^{\circ}N$和$6^{\circ}N$之间），得出了天王星对流层上层中氦的摩尔分数为0.152 ± 0.033，相应的质量分数为0.262 ± 0.048；1991 年 Conrath 等人[66]利用相同的方法得出海王星大气中氦的摩尔分数为0.190 ± 0.032，相应的质量分数为0.32 ± 0.05。

氦的同位素 $^{3}\mathrm{He}$可以作为核聚变燃料为人类提供能源，目前人们已经在月壤中发现了 $^{3}\mathrm{He}$的存在。2010 年法文哲和金亚秋[67]使用“嫦娥一号”的多通道微波辐射计数据得出了月壤中 $^{3}\mathrm{He}$的含量为$6.6\times10^{8}\mathrm{kg}$；$^{3}\mathrm{He}$在天王星大气中的丰度为$1.52\times10^{-5}$[68]，是月球上含量的上百倍。Carpenter 等人[69]以及 Powell 等人[70]都曾提出了开采天王星大气中 $^{3}\mathrm{He}$的想法，2012 年时 Palaszewski[68]则提出了开采天王星和海王星大气中某些元素的详细方案，譬如 $^{3}\mathrm{He}$。也许在不久的将来人类利用冰巨星大气中的原料进行核聚变将会变成现实。

氢和氦是原始行星盘中重要的物质，两者在冰巨星大气中的精确丰度是研究行星形成和演化的重要参数，同时 D 和 $^{3}\mathrm{He}$也是重要的核聚变燃料。目前对氘的丰度探测主要是在红外波段进行的，而氦最精确的丰度则是使用”旅行者 2 号”的红外和射电掩星的数据得出的，因此想要得到更为精确的数据并在未来利用这些核能燃料，需要进一步的就位探测。

4 太阳系外冰巨星

根据 NSNA 统计数据[1]，目前已证认了 3397 颗系外行星的存在（截止 2016 年 10 月 20 日），这些系外行星的体积分布在 0.001M_{J}（M_{J}为木星质量）到 100M_{J}这个大区间内，其中体积在 0.01M_{J}到 0.1M_{J}之间的类海王星系外行星（Neptune-like）就有 210 个，这说明了类海王星系外行星是普遍存在的。

2008 年 Sousa 等人[71]在研究宿主恒星的金属丰度与类海王星系外行星出现频率的关系时发现，当宿主恒星的金属丰度上升时，其恒星系统内的类木行星与类海王星行星的比值也在上升，研究认为是由于行星形成时的核心吸积而产生的这种现象；但是他们也发现了一个特殊的现象，那就是在大多数的 M 型矮星系统中只发现了类海王星行星，这为研究类海王星行星的形成和演化提供了一个新的方向。

类海王星系外行星按照轨道半径的不同又可分为热或冷两类，热海王星(Hot Neptune-like)距离宿主恒星很近，温度可达到 400K[72]，而距离宿主恒星较远的则称之为冷海王星(Cool Neptune-like)。由于目前的主要的探测方法是视向速度法、掩星法和天体测量法，它们对于轨道半径较大的冷海王星的探测是不敏感的，冷海王星的探测主要依靠微引力透镜法[73]，因此对于冷海王星的研究比较匮乏。GJ 436b 是人们发现并确认的第一颗类海王星系外行星[74, 75]，它距离宿主恒星只有 0.03AU[72]。热海王星受到极近距离恒星风的侵蚀，导致其大气不断逃逸[76]，甚至有可能逐渐损失所有的大气[77]。Ehrenreich 等人在 2015 年[77]研究 GJ 436b 的大气逃逸率是发现，其大气逃逸率大约为$10^{8}-10^{9}\mathrm{g/s}$，远远不足以在宿主恒星的寿命内耗散掉全部的大气。距离宿主恒星非常近的类海王星，受到潮汐锁定的影响，一侧长时间受到宿主恒星的强烈辐射，其大气结构和热木星非常类似，热木星会通过向“较冷”的极区和背阳面传输热量来降低恒星辐射带来的影响[78, 79]，通过模拟发现这种冷却模式和各向同性的辐射模型非常相似，并且发现受到高辐射的行星，在$\mu\mathrm{B}\gtrsim10\mathrm{km/s}$（$\mu$是纬向风速，B 是大气中偶极磁场的强度）时是不稳定的[78]。

通过研究系外类海王星行星的大气温度、大气中金属元素丰度以及 C/O 比等多种特征，发现类海王星大气成分是非常多样化的[72]；Figueira 等人[80]在研究 GJ 436 周围的热海王星时，根据大气中“冰”含量和重元素含量的不同将类海王星分为 3 类（成分分类见表格 2），分别是热海王星 I 型（“冰”的含量稍高，岩石和金属含量较低）、热海王星 II 型（“冰”的含量稍低，岩石和金属含量较高）和干海王星（“冰”的含量为零）。

系外热海王星的大气对流状态也与热木星类似。由于十分靠近宿主恒星，大气对流

[1] 数据来源：exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

表格 2：类海王星行星分类

元素丰度	热海王星 I 型	热海王星 II 型	干海王星
H/He	0.10	0.10	0.20
Ices	0.60	0.40	0.00
Rock	0.20	0.33	0.53
Iron	0.10	0.17	0.27
Radius(km)	27355	25929	27096

强烈受到恒星辐射的影响，与恒星的有效温度、公转轨道（距离、偏心率）、自转速度（是否潮汐锁定）、自转倾角以及行星的大气组成等因素密切相关，表现出与太阳系冰巨星（天王星、海王星）迥异的大气运动状态。随着更多系外热海王星的发现，这些问题正逐步成为未来研究的热点[81]。

一些类海王星距离宿主恒星的距离比水星距离太阳的距离（0.3AU）还要近，因此推测它们曾经有过轨道迁移[80]。Ida 和 Lin 在 2008 年[82]研究 I 型行星迁移理论对行星形成的影响时，认为 I 型迁移是导致这种系外气体巨行星轨道半长轴分布的主要原因，I 型迁移则是由原行星胎与它们的初始盘之间相互潮汐力作用引起的；由于发现的系外行星系统中其宿主恒星有大约 20%的是双星系统甚至是多星系统，因此 Kozai–Lidov 效应和潮汐耗散的联合机制也会使得系外行星轨道半长轴逐渐减小[83]；对太阳系演化的研究也表明了冰巨星在形成过程中存在轨道迁移，比如天王星和海王星在原气体盘消散后由于残留星子盘之间的相互作用而向外迁移[84]。因此对系外类海王星进行研究将有助于理解行星的形成和演化。随着越来越多类海王星的发现和探测技术的不断进步，对于这类行星的形成和演化的认识也将逐步加深，同时深化了对太阳系内两颗冰巨星的认识和研究。

5 总结与展望

自从十八、十九世纪先后发现天王星和海王星后，人们对于这两颗行星的研究就从未停止，但是直到上世纪八十年代“旅行者 2 号”飞船飞掠它们时，我们才对这两颗遥远的冰巨星有了初步的了解；进入九十年代后，随着凯克望远镜等一系列大口径地面望远镜和哈勃空间望远镜等天基望远镜投入使用，我们对于天王星和海王星的了解又更进了一步，我们不仅可以了解它们的大气成分、大气动力学和内部结构，还可以通过积累的数据对它们的时变信息进行研究。例如 2008 年 Kramer 等人[85]使用坐落在法国南部的 IRAM 射电望远镜对天王星和海王星长达二十年的观测数据进行分析，进而得出两颗冰巨星亮温度的长期变化；2016 年 Irwin 等人[86]使用 2009 年至 2013 年甚大望远镜和北双子座望远镜的观测数据来研究海王星大气中云层的水平和垂直结构；以及同年 Aplin 等人[87]通过 1972 年至 2014 年观测到的海王星亮度数据来分析太阳对海王星大气的周期性影响。

观测手段的不断进步使得我们可以对冰巨星大气进行更为精确的研究，与此同时观测数据的积累和数据处理方法的更新也将使得我们对其大气的时变信息有更深的认识。但是对于冰巨星大气中风暴组织的成因以及其成份，以及冰巨星磁场非两极对称的结构仍然有很多未知的问题等待探索。尽管有了不断改进的技术和不断积累的数据，大气中

各成分的确切丰度以及分布情况仍然未得到充分的了解，未来需要更高分辨率的光谱观测数据，更多波段（比如红外、紫外等波段）的观测数据和更多手段（比如射电掩星观测、就位探测）的观测数据来进行研究；同时也需要对以往积累的观测数据进行整理对比，并不间断的对两颗冰巨星进行观测，用来研究两颗冰巨星的季节变化。

近年来随着航天技术的飞速发展，人们越来越希望可以对两颗冰巨星进行就位探测，2014 年 Agrawal 等人[88]便提出了对天王星进行就位探测的方案。通过就位探测我们可以更加精确的了解到天王星和海王星大气中成分和动力学信息、磁场结构、磁层与太阳风的交换机制以及内部结构，同时还可以更加深入的了解其卫星的信息，从而加深对太阳系形成和行星形成理论的认识。随着越来越多的系外冰巨星的发现，将使得我们对于这类行星的形成和演化有更深入的了解，同时对于类海王星大气成分、动力学机制的研究也在逐步发展。对类海王星大气的研究依赖于望远镜的观测精度，在未来即将发射的JWST(詹姆斯·韦伯空间望远镜)等也将对类海王星大气进行深入的了解。对系外类海王星的研究将进一步加深对太阳系的形成和演化的认识，同时对天体生物学、系外行星探测与演化等研究提供重要的理论基础和观测依据，具有重要的研究价值和科学意义。

参考文献：

1. Guillot, T. and D. Gautier, *Giant Planets.* Eprint Arxiv, 2014. **28**(2): p. 439–464.
2. Arridge, C.S., et al., *Uranus Pathfinder: exploring the origins and evolution of Ice Giant planets.* Experimental Astronomy, 2011. **33**(2-3): p. 753-791.
3. Nettelmann, N., et al., *Uranus evolution models with simple thermal boundary layers.* Icarus, 2016. **275**: p. 107-116.
4. Smith, B.A. and J. Veverka, *Voyager 2 in the Uranian System: Imaging Science Results.* Science, 1986. **233**(4759): p. 43-64.
5. Tyler, G.L. and R.A. Simpson, *Voyager 2 radio science observations of the uranian system: atmosphere, rings, and satellites.* Science, 1986. **233**(4759): p. 79-84.
6. Smith, B.A. and J. Veverka, *Voyager 2 at neptune: imaging science results.* Science, 1990. **246**(4936): p. 1422-49.
7. Lindal, G.F., et al., *The atmosphere of Uranus: Results of radio occultation measurements with Voyager 2.* Journal of Geophysical Research, 1987. **92**(A13): p. 14987.
8. Lindal, G.F., *The atmosphere of Neptune - an analysis of radio occultation data acquired with Voyager 2.* Astronomical Journal, 1992. **103**(3): p. 967-982.
9. Pollack, J.B., et al., *Formation of the Giant Planets by Concurrent Accretion of Solids and Gas ☆.* Icarus, 1996. **124**(1): p. 62-85.
10. Bryden, G., D.N.C. Lin, and S. Ida, *Protoplanetary Formation. I. Neptune.* Astrophysical Journal, 2008. **544**(1): p. 481-495.
11. Lopez, E.D., J.J. Fortney, and N.K. Miller, *How Thermal Evolution and Mass Loss Sculpt Populations of Super-Earths and Sub-Neptunes: Application to the Kepler-11 System and Beyond.* Astrophysical Journal, 2012. **761**(1): p. 1702-1711.
12. Nellis, W.J., *The unusual magnetic fields of Uranus and Neptune.* Modern Physics Letters B, 2015. **29**(1).
13. Stevenson, D.J., *Planetary Magnetic Fields: Achievements and Prospects.* Space Science Reviews, 2010. **152**(1-4): p. 651-664.

14. 乔荣川, 沈凯先, and 刘建荣, *天王星卫星的星历表计算.* 时间频率学报, 1997: p. 60-65.
15. 乔荣川 and 钱伯辰, *1995 年天王星卫星位置观测的重新归算.* 时间频率学报, 1999(2): p. 147-150.
16. 张会彦, et al., *小口径望远镜对 Triton 的观测与资料分析.* 时间频率学报, 2014. **37**(2): p. 119-128.
17. Camargo, J.I.B., et al., *Astrometry of the main satellites of Uranus: 18 years of observations.* Astronomy & Astrophysics, 2015. **582**.
18. 沈凯先, 乔荣川, and 刘建荣, *现代天王星卫星运动定量理论的研究和发展.* 天文学进展, 2004. **22**(1): p. 45-56.
19. Norwood, J.W. *The Atmospheres of Uranus and Neptune*. in *The Workshop on the Study of the Ice Giant Planets*. 2014.
20. Karkoschka, E. and M. Tomasko, *The haze and methane distributions on Uranus from HST-STIS spectroscopy.* Icarus, 2009. **202**(1): p. 287-309.
21. Karkoschka, E. and M.G. Tomasko, *The haze and methane distributions on Neptune from HST–STIS spectroscopy.* Icarus, 2011. **211**(1): p. 780-797.
22. Hildebrand, R.H., et al., *Far-infrared and submillimeter brightness temperatures of the giant planets.* Icarus, 1985. **64**(1): p. 64-87.
23. Orton, G.S., *Thermal spectrum of uranus: implications for large helium abundance.* Science, 1986. **231**(231): p. 836-40.
24. Conrath, B., et al., *The helium abundance of Uranus from Voyager measurements.* Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1988. **92**(A13): p. 15003-15010.
25. Stone, E.C. and E.D. Miner, *The voyager 2 encounter with the uranian system.* Science, 1986. **233**(4759): p. 39-43.
26. Smith, B.A., et al., *Voyager 2 at Neptune.* Science, 1989. **246**(4936): p. 1422-1449.
27. Eshleman, R., *The Atmosphere of Saturn: An Analysis of the Voyager Radio Occultation Measurements,.* 1985.
28. Lindal, G.F., et al., *The atmosphere of Jupiter: An analysis of the Voyager radio occultation measurements.* Astronomical Journal, 1985. **90**(A10): p. 8721–8727.
29. Stanley, S. and J. Bloxham, *Convective-region geometry as the cause of Uranus' and Neptune's unusual magnetic fields.* Nature, 2004. **428**(6979): p. 151-3.
30. Cao, X. and C.S. Paty. *A Seasonal Study of Uranus' Magnetosphere*. in *AGU Fall Meeting*. 2014.
31. Vasyliunas, V.M. *The magnetospheres of Uranus and Neptune: what we know and what we don't know*. 2011.
32. Tyler, G.L., et al., *Voyager radio science observations of neptune and triton.* Science, 1989. **246**(4936): p. 1466-73.
33. Sromovsky, L., P. Fry, and J.H. Kim, *Methane on Uranus: The case for a compact CH4 cloud layer at low latitudes and a severe CH4 depletion at high-latitudes based on re-analysis of Voyager occultation measurements and STIS spectroscopy.* Icarus, 2011. **215**(1): p. 292-312.
34. Tice, D.S., et al., *Uranus' cloud particle properties and latitudinal methane variation from IRTF SpeX observations.* Icarus, 2013. **223**(2): p. 684-698.
35. Allison, M., et al., *Uranus atmospheric dynamics and circulation.* Uranus, 1991. **-1**: p. 253-295.

36. Karkoschka, E., *Clouds of High Contrast on Uranus.* Science, 1998. **280**(5363): p. 570-2.
37. Hammel, H.B., et al., *New Measurements of the Winds of Uranus ☆.* Icarus, 2001. **153**(2): p. 229-235.
38. Sromovsky, L.A. and P.M. Fry, *Dynamics of cloud features on Uranus ☆.* Icarus, 2015. **179**(2): p. 459-484.
39. Fry, P.M., et al., *Detection and Tracking of Subtle Cloud Features on Uranus.* The Astronomical Journal, 2012. **143**(6): p. 150.
40. Limaye, S.S. and L.A. Sromovsky, *Winds of Neptune - Voyager observations of cloud motions.* Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1991. **96**(S01): p. 18941–18960.
41. Aurnou, J., M. Heimpel, and J. Wicht, *The effects of vigorous mixing in a convective model of zonal flow on the ice giants.* Icarus, 2007. **190**(1): p. 110-126.
42. Hunt, G.E., B.J. Conrath, and J.A. Pirraglia, *Visible and infrared observations of Jovian plumes during the Voyager encounter.* Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1981. **86**(A10): p. 8777–8781.
43. Pearl, J.C., et al., *The albedo, effective temperature, and energy balance of Uranus, as determined from Voyager IRIS data.* Icarus, 1990. **84**(1): p. 12–28.
44. Liu, J. and T. Schneider, *Convective Generation of Equatorial Superrotation in Planetary Atmospheres.* Journal of the Atmospheric Sciences, 2011. **68**(5): p. 2742-2756.
45. Busse, F.H., *A simple model of convection in the Jovian atmosphere.* Icarus, 1976. **29**(2): p. 255-260.
46. Christensen, U.R., *Zonal flow driven by strongly supercritical convection in rotating spherical shells.* Journal of Fluid Mechanics, 2002. **470**(470): p. 115-133.
47. Aurnou, J.M. and P.L. Olson, *Strong zonal winds from thermal convection in a rotating spherical shell.* Geophysical Research Letters, 2001. **28**(13): p. 2557–2559.
48. Glatzmaier, G.A. *Planetary and stellar dynamos: challenges for next generation models*. in *Fluid Dynamics and Dynamos in Astrophysics and Geophysics*. 2005.
49. Heimpel, M., J. Aurnou, and J. Wicht, *Simulation of equatorial and high-latitude jets on Jupiter in a deep convection model.* Nature, 2005. **438**(7065): p. 193-6.
50. Heimpel, M. and J. Aurnou, *Turbulent convection in rapidly rotating spherical shells: A model for equatorial and high latitude jets on Jupiter and Saturn.* Icarus, 2007. **187**(2): p. 540-557.
51. Glatzmaier, G.A., M.E. Rogers, and T. M., *Differential rotation in giant planets maintained by density-stratified turbulent convection.* Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics, 2009. **103**(1): p. 31-51.
52. Yuan, L. and A.P. Showman, *Generation of equatorial jets by large-scale latent heating on the giant planets.* Icarus, 2010. **207**(1): p. 373-393.
53. Sromovsky, L.A., S.S. Limaye, and P.M. Fry, *Dynamics of Neptune's Major Cloud Features.* Icarus, 1993. **105**(1): p. 110-141.
54. Kaspi, Y., et al., *Atmospheric confinement of jet streams on Uranus and Neptune.* Nature, 2013. **497**(7449): p. 344-7.
55. Irwin, P.G.J., et al., *Spectral analysis of Uranus' 2014 bright storm with VLT/SINFONI.* Icarus, 2016. **264**: p. 72-89.
56. Baines, K.H., et al., *The Abundances of Methane and Ortho/Para Hydrogen on Uranus and Neptune: Implications of New Laboratory 4-0 H 2 Quadrupole Line Parameters.* Icarus,

1995. **114**(2): p. 328-340.
57. Lellouch, E., et al., *New constraints on the CH4vertical profile in Uranus and Neptune fromHerschelobservations.* Astronomy & Astrophysics, 2015. **579**: p. A121.
58. Sromovsky, L.A., et al., *Methane depletion in both polar regions of Uranus inferred from HST/STIS and Keck/NIRC2 observations ☆.* Icarus, 2015. **238**(2): p. 137-155.
59. Sromovsky, L.A., et al., *Uranus at equinox: Cloud morphology and dynamics ☆.* Icarus, 2015. **40**(1): p. 265-286.
60. Luszcz-Cook, S.H., et al., *Retrieving Neptune's aerosol properties from Keck OSIRIS observations. I. Dark regions.* Icarus, 2016. **276**: p. 52-87.
61. Smith, W.H., et al., *D/H for Uranus and Neptune.* Astrophysical Journal, 1988. **336**(2): p. 962-966.
62. Feuchtgruber, H., et al., *Detection of HD in the atmospheres of Uranus and Neptune: a new determination of the D/H ratio.* Astronomy & Astrophysics, 1998. **341**(1): p. L17-L21.
63. Geiss, J. and G. Gloeckler, *Abundances of Deuterium and Helium-3 in the Protosolar Cloud.* Space Science Reviews, 1998. **84**(1): p. 239-250.
64. Feuchtgruber, H., et al., *The D/H ratio in the atmospheres of Uranus and Neptune from Herschel-PACS observations.* Astronomy & Astrophysics, 2013. **551**: p. 126-135.
65. Gautier, D. and K. Grossman, *A New Method for the Determination of the Mixing Ratio Hydrogen to Helium in the Gaint Planet.* Journal of the Atmospheric Sciences, 1972. **29**(4).
66. Conrath, B.J., et al., *The helium abundance of Neptune from Voyager measurements.* Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1991. **96**(S01): p. 18907-18919.
67. 法文哲 and 金亚秋, *"嫦娥一号"多通道微波辐射计测量估算全月球月壤层氦 3 含量.* 科学通报, 2010. **55**(32): p. 3097-3101.
68. Palaszewski, B. *Atmospheric Mining in the Outer Solar System: Resource Capturing, Storage, and Utilization*. in *Aiaa/asme/sae/asee Joint Propulsion Conference & Exhibit*. 2012.
69. Carpenter, S.A., et al. *Assessing the Mirror Fusion Propulsion System (MFPS) Concept as Applied to Outer-Solar-System (OSS) Missions*. in *American Institute of Physics Conference Series*. 1994.
70. Powell, J., et al., *MITEE-B: A Compact Ultra Lightweight Bi-Modal Nuclear Propulsion Engine for Robotic Planetary Science Missions.* 2003. **654**(1): p. 429-437.
71. Sousa, S.G., et al., *Spectroscopic parameters for 451 stars in the HARPS GTO planet search program: Stellar [Fe/H] and the frequency of exo-Neptunes.* Astronomy & Astrophysics, 2008. **487**(1): p. 373-381.
72. Moses, J.I., et al., *Compositional diversity in the atmospheres of hot Neptunes, with application to GJ 436b.* Astrophysical Journal, 2013. **777**(1): p. 617-646.
73. Gould, A., et al., *Microlens OGLE-2005-BLG-169 Implies That Cool Neptune-like Planets Are Common.* Astrophysical Journal Letters, 2007. **644**(1): p. 88.
74. Butler, P., et al., *A Neptune-Mass Planet Orbiting the Nearby M Dwarf GJ 436.* Astrophysical Journal, 2004. **617**(1): p. 580-588.
75. Maness, H.L., G.W.Marcy, and E.B. Ford, *The M Dwarf GJ 436 and its Neptune-Mass Planet.* Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2007. **119**(851): p. 90-101.
76. Etangs, A.L.D., et al., *Temporal variations in the evaporating atmosphere of the exoplanet HD 189733b.* Astronomy & Astrophysics, 2012. **543**(1): p. 231-235.

77. Ehrenreich, D., et al., *A giant comet-like cloud of hydrogen escaping the warm Neptune-mass exoplanet GJ 436b.* Nature, 2015. **522**(7557): p. 459-61.
78. Spiegel, D.S. and A. Burrows, *Thermal Processes Governing Hot-Jupiter Radii.* Astrophysical Journal, 2013. **772**(1): p. 57-61.
79. Ginzburg, S. and R.E. Sari, *Hot-Jupiter Inflation due to Deep Energy Deposition.* Astrophysical Journal, 2015. **803**(2).
80. Figueira, P., et al., *Bulk composition of the transiting hot Neptune around GJ 436.* Astronomy & Astrophysics, 2008. **493**(2): p. 671-676.
81. Lewis, N.K., et al., *Atmospheric Circulation of Eccentric Hot Neptune GJ436b.* Astrophysical Journal, 2010. **720**(1): p. 344-356.
82. Ida, S. and D.N.C. Lin, *Toward a deterministic model of planetary formation. IV. Effects of type I migration.* Astrophysical Journal, 2008. **673**(1): p. 487-501.
83. Petrovich, C., *Steady-state planet migration by the Kozai-Lidov mechanism in stellar binaries.* Astrophysical Journal, 2014. **799**(1).
84. Izidoro, A., et al., *Accretion of Uranus and Neptune from inward-migrating planetary embryos blocked by Jupiter and Saturn.* Astronomy & Astrophysics, 2015. **582**.
85. Kramer, C., R. Moreno, and A. Greve, *Long-term observations of Uranus and Neptune at 90 GHz with the IRAM 30m telescope - (1985 -- 2005).* Astronomy & Astrophysics, 2008. **482**(1): p. 359-363.
86. Irwin, P.G.J., et al., *Time variability of Neptune's horizontal and vertical cloud structure revealed by VLT/SINFONI and Gemini/NIFS from 2009 to 2013.* Icarus, 2016. **271**: p. 418-437.
87. Aplin, K.L. and R.G. Harrison, *Determining solar effects in Neptune's atmosphere.* Nature Communications, 2016. **7**.
88. Agrawal, P., et al. *Atmospheric entry studies for Uranus*. in *IEEE Aerospace Conference*. 2014.

Research Progress on the Atmosphere of Ice Giant Planet

WANG Cong[1,3] XIONG Ming[1,3] LI li-gang[2,3,4] CHEN Ding[1,3]

(1、 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)
(2、 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200030)
(3、 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049)
(4、 Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200030)

Abstract: The giant planet planets being mainly composed of elements heavier than hydrogen and helium are defined as ice giant planets. The Uranus and Neptune are two typical ice giant planets in the solar system.

Since the atmosphere of ice giant preserves the earliest gas when solar system formed, it would be great help to understand the formation and evolution of the planetary system. Study on the dynamics of the atmosphere can reveal the structure, convection mechanism and its thermal driving of the atmosphere. How different kinds of planets are ultimately generated from an initial primordial cloud of gas and dusts can be explored by a comparative study between the ice giant planets and Jupiter-like planets. The Neptune-like exoplanets are found to be ubiquitous from more and more exoplanets identified during the recent years, which provide a strong observation evidence for planetary migration theories. The ice giant planets not only play important role in the early stage of the formation of stellar system, but also their atmospheric compositions are important parameters in the study of their host stars.

This paper reviews the research progress on the atmospheres of Uranus and Neptune, including the vertical thermal structure, chemical composition and wind distribution with latitude. The ice giant planets of the extrasolar systems are also discussed. Challenges and future observation are suggested based on our current understanding of the ice giant planets.

Key words: planet; ice giant planet; atmosphere; composition; exoplanets